




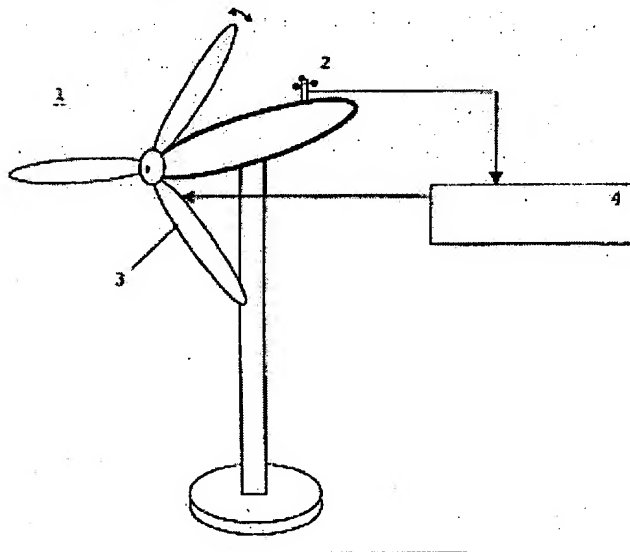
# Method and device for processing and predicting the flow parameters of turbulent media

**Patent number:** DE10033183  
**Publication date:** 2002-01-24  
**Inventor:** RAGWITZ MARIO (DE); KANTZ HOLGER (DE)  
**Applicant:** MAX PLANCK GESELLSCHAFT (DE)  
**Classification:**  
 - international: G01W1/00; G05D13/00; G01M9/00; F03D7/00; G01P5/00  
 - european: F03D7/00, G05B13/04D, G05B17/02  
**Application number:** DE20001033183 20000707  
**Priority number(s):** DE20001033183 20000707

Also published as:	
	WO0205041 (A3)
	WO0205041 (A2)
	US2003160457 (A1)

## Abstract of DE10033183

The invention relates to a method for processing and/or predicting the flow data of a flowing medium. According to said method, a projected time series is respectively formed from values of at least one flow parameter, which are continuously measured in succession at one or several places in the medium, said parameter characterizing the speed of the medium. The time series is subjected to a non-linear deterministic prediction procedure, based on a local constant phase space model, for providing predicted values for the respective subsequent flow parameters. A predetermined control signal is generated if the predicted values are characteristic of an imminent modification to the flow speed. The invention also relates to uses of said method for controlling wind generators.



Data supplied from the *esp@cenet* database - Worldwide

1



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 100 33 183 A 1**

⑳ Aktenzeichen: 100 33 183.1  
㉔ Anmeldetag: 7. 7. 2000  
㉕ Offenlegungstag: 24. 1. 2002

㉙ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 W 1/00**  
G 05 D 13/00  
G 01 M 9/00  
F 03 D 7/00  
G 01 P 5/00

DE 100 33 183 A 1

㉙ Anmelder:  
Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der  
Wissenschaften e.V., 80539 München, DE  
  
㉚ Vertreter:  
v. Bezold & Sozien, 80799 München  
  
㉛ Erfinder: ———  
Ragwitz, Mario, 01324 Dresden, DE; Kantz, Holger,  
Dr., 01187 Dresden, DE

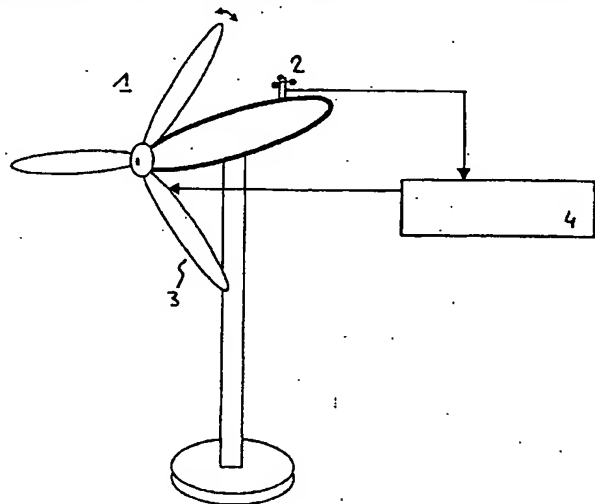
㉞ Entgegenhaltungen:  
DE 41 02 923 A1  
JP 08-1 66 465 A  
U.Schlink: Wind Speed Forecasting from 1 to 30  
Minutes. In: Theor.Appl.Climatol. Bd. 60, 1998,  
S. 191-198;  
M.Casdagli: Chaos and Deterministic versus Stocja-  
stic Non-linear Modelling. In: J.R. Statist.Soc.  
B., Band 54, 1991, S. 303-328;  
F. Takens: Detecting Strange Attractors in Turbu-  
lence. In: Lecture Notes in Math, Bd. 898, Sprin-  
ger, New York 1981, S. 366-381;  
T. Sauer et al.: Embedology. In: J. Stat.Phys.,  
Bd. 65, 1991, S. 579-616;  
J.F. Gibson et al.: An anlyatic approach to prac-  
tical state space reconstruction. In: Physica D,  
Band 57, 1992, S. 1-30;  
Wind Conditions for Wind Turbine Design, Interna-  
tional Energy Agency, 2nd Synposium, April 1999,  
ISSN 0590-8809, S. 10;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

㉞ Verfahren und Vorrichtung zur Verarbeitung und Vorhersage von Strömungsparametern turbulenter Medien

㉙ Es wird ein Verfahren zur Verarbeitung und/oder Vor-  
hersage von Strömungsdaten eines strömenden Medi-  
ums beschrieben, bei dem aus laufend an einem oder ver-  
schiedenen Orten im Medium aufeinanderfolgend ge-  
messenen Werten mindestens eines Strömungsparame-  
ters, der für die Geschwindigkeit des Mediums charakte-  
ristisch ist, eine jeweils fortgeschriebene Zeitreihe gebil-  
det wird, die einer nicht-linear deterministischen Vorher-  
sageprozedur auf der Grundlage eines lokal konstanten  
Phasenraummodells zur Erzeugung von Vorhersagewer-  
ten für die jeweils folgenden Strömungsparameter un-  
terzogen wird, wobei ein vorbestimmtes Steuersignal er-  
zeugt wird, wenn die Vorhersagewerte für eine kommen-  
de Änderung der Strömungsgeschwindigkeit chrakteris-  
tisch sind. Es werden auch Anwendungen des Verfah-  
rens bei der Steuerung von Windgeneratoren beschrie-  
ben.



DE 100 33 183 A 1

- [0001] Die Erfindung betrifft Verfahren zur Verarbeitung von Strömungsparametern turbulenter Medien, insbesondere Verfahren zur Vorhersage der Strömungsgeschwindigkeit in strömenden Medien und zur Vorhersage bestimmter nicht-linearer Effekte, z. B. von Böen in atmosphärischen Luftbewegungen. Die Erfindung betrifft auch die Anwendung derartiger Verfahren zur Steuerung der Betriebsparameter mechanischer Einrichtungen in turbulenten Strömungen, wie z. B. windbetriebenen Stromgeneratoren, und Vorrichtungen zur Umsetzung derartiger Verfahren. Die Erfindung ist auch auf die Steuerung komplexer technischer Vorgänge gerichtet, bei denen die Vorhersage der Windgeschwindigkeit von Bedeutung ist, wie sie z. B. auf Flughäfen, bei der Steuerung von Wind-Diesel-Systemen oder bei der Integration von Windgeneratoren in Versorgungsnetze auftreten.
- [0002] Die Untersuchung turbulent strömender Medien (Flüssigkeiten oder Gase) ist in den verschiedensten technischen Gebieten von Interesse. Bspw. besteht ein Bestreben nach einem besseren Verständnis der Dynamik von atmosphärischen Luftbewegungen nahe der Erdoberfläche (Winddynamik), um Informationen für die Wettervorhersage oder für Turbulenzvorhersagen zu gewinnen. Diese beiden Aufgaben unterscheiden sich durch den Vorhersagezeitraum und durch die räumliche Auflösung der Vorhersage. Zu ihrer Lösung werden jeweils angepasste Vorhersagemodelle verwendet. Zur Wettervorhersage mit einem längeren Vorhersagehorizont von mindestens einigen Stunden werden numerische Methoden aus der Kontinuumsmechanik auf der Basis von Navier-Stokes-Gleichungen verwendet, die das vorhergesagte Windfeld im betrachteten Raumvolumen ausgeben. Für eine lokale Turbulenzvorhersage mit kürzerem Zeithorizont im Sekunden- oder Minutenbereich kann grundsätzlich auf eines der folgenden Modelle zurückgegriffen werden.
- [0003] Es ist erstens auch bei der lokalen Turbulenzvorhersage möglich, die Lösung von Navier-Stokes-Gleichungen zu verwenden. Aus bekannten Startwerten der Windgeschwindigkeit und des Druckes im Medium und aus Randbedingungen könnten theoretisch die Feldgleichungen gelöst und auf dieser Grundlage Vorhersagen getroffen werden. Numerische Lösungen der entsprechenden partiellen Differentialgleichungen sind prinzipiell schwierig und bei den typischerweise hohen Reynoldszahlen unter atmosphärischen Bedingungen nahezu unmöglich. Übliche Näherungsverfahren (z. B. Linearisierung der Gleichungen, Reduktion der Dimensionalität oder Annahme der Rotationsfreiheit des Vektorfeldes) können nicht durchgeführt werden, da die Nicht-Linearität, die Dreidimensionalität und das Auftreten von Wirbeln von entscheidender Bedeutung für die Natur der Lösungen sind. Außerdem erschweren die riesige Ausdehnung des Systems Atmosphäre und die große Entfernung der atmosphärischen Grenzschicht von einem Gleichgewichtszustand die numerische Betrachtung der Feldgleichungen. Außerdem können in kaum einer praktischen Situation die Anfangs- und Randbedingungen mit hinreichender Genauigkeit angegeben werden, um die Integration der Gleichung zu ermöglichen. Die Lösung der hydrodynamischen Gleichungen stellt somit keine praktisch relevante Option für das betrachtete Problem dar.
- [0004] Des Weiteren ist die Anwendung linear-stochastischer Modelle möglich. In Situationen, wo Vorhersagen auf der Basis einer oder weniger gemessener Zeitreihen getroffen werden müssen, und keine räumlich hinreichend gut aufgelösten Rand- und Anfangsbedingungen existieren, werden gegenwärtig typischerweise diese linearen Methoden verwendet (siehe U. Schlink in "Theor. Appl. Climatol." Bd. 60, 1998, S. 191 ff.). Lineare Korrelationen der Lösungen von Navier-Stokes-Gleichungen bzw. der gemessenen Daten werden ausgewertet und die Abweichung von den linearen Korrelationen durch ein Rauschen angenähert. Die linear-stochastische Vorhersage setzt das Vorhandensein ausgeprägter globaler linear-deterministischer Anteile im Strömungsverhalten voraus, um aus linearen Korrelationen in gemessenen Zeitreihen ausreichend gute Vorhersageergebnisse zu erzielen. Hierbei bedeutet "global", dass lineare Korrelationen zwischen den letzten gemessenen Werten der Zeitreihe an den betrachteten Raumpunkten und dem vorherzusagenden Wert der Windgeschwindigkeit zu allen Zeiten und in allen Wittersituationen als konstant angenommen werden. Somit ist der deterministische Anteil eines durch linear-stochastische Modelle darstellbaren Verhaltens auf eine relativ kleine Klasse möglicher Prozesse begrenzt. Im Wesentlichen lassen sich harmonische Oszillationen und exponentielles Verhalten modellieren. Diese Modelle versagen, jedoch bei chaotischen Zeitreihen mit nicht-linear deterministischem Charakter. Die wichtigste Klasse der linear-stochastischen Modelle sind autoregressive Modelle (AR-Modelle), auf die unten im Einzelnen eingegangen wird.
- [0005] Ein dritter Ansatz zur Vorhersage von Strömungsgeschwindigkeiten in turbulenten Medien verwendet Methoden der nicht-linearen Zeitreihenanalyse auf der Grundlage der Konzepte des niedrigdimensionalen deterministischen Chaos. Insbesondere durch das komplexe dynamische Verhalten atmosphärischer Luftmassen folgen die Strömungsparameter aperiodischen, schwer vorhersagbaren und oft auch schwer klassifizierbaren Verläufen. Mit der nicht-linearen Zeitreihenanalyse wird versucht, aus beobachteten, gemessenen Daten möglichst viel über die Eigenschaften oder den Zustand des betrachteten Systems zu lernen. Bekannte Analyseverfahren zum Verständnis aperiodischer Signale werden z. B. von H. Kantz et al. in "Nonlinear Time Series Analysis", Cambridge University Press, Cambridge, 1997 oder von H. B. I. Abarbanel in "Analysis of Observed Chaotic Data", Springer, New York 1996, beschrieben. Diese Verfahren basieren auf dem Konzept des deterministischen Chaos. Deterministisches Chaos bedeutet, dass ein Systemzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt in eindeutiger Weise den Systemzustand zu jedem beliebigen späteren Zeitpunkt festlegt, das System aber dennoch über längere Zeit unvorhersehbar ist. Dies ergibt sich daraus, dass der aktuelle Systemzustand mit einem unvermeidlichen Fehler erfasst wird, dessen Wirkung je nach Bewegungsgleichung des Systems exponentiell wächst. Nach einer systemtypischen Zeit besitzt ein simulierter Modellzustand mit dem Realzustand des Systems keine Ähnlichkeit mehr. Für kürzere Zeiten lassen sich Systemzustände, die durch charakteristische Muster in der Zeitreihe dargestellt werden, jedoch mit guter Genauigkeit vorhersagen.
- [0006] Auf die Zeitreihenanalyse von Winddaten wird bspw. von M. Casdagli in "J. R. Statist. Soc. B." Band 54, 1991, Seite 303 ff. und von J. Hausmann "Zeitreihenanalyse und Steuerung autonomer Wind-Diesel-Systeme mit neuronalen Netzwerken", Diplomarbeit Universität Oldenburg, 1995, eingegangen. Für die Analyse skalarer (univariater) Zeitreihen hat sich herausgestellt, dass die Vorhersagefehler aus den linear-stochastischen Modellen einerseits und der nicht-linearen Zeitreihenanalyse andererseits im zeitlichen Mittel auf die gleiche (geringe) Zuverlässigkeit der Modelle schließen lassen. In den genannten Arbeiten wurde festgestellt, dass mit dem Konzept des deterministischen Chaos über den Be-

obachtungszeitraum gemittelt keine entscheidende Verbesserung der Turbulenzvorhersage erreicht werden kann. Die univariate, nicht-lineare Zeitreihenanalyse besitzt im zeitlichen Mittel deutliche Vorteile lediglich bei der Vorhersage schwach turbulenter Daten mit wenigen angeregten Freiheitsgraden. Der Kontrollparameter für die Turbulenz ist die Reynoldszahl. Turbulente Medien mit Reynoldszahlen bis zu etwa  $10^2$  können gut durch niedrigdimensional-deterministische Modelle beschrieben werden. Atmosphärische Turbulenz in bodennahen Luftströmungen zeichnen sich jedoch durch Reynoldszahlen aus, die einige Größenordnungen höher sind. Somit lassen sich solche Phänomene im Allgemeinen nicht durch Konzepte des deterministischen Chaos beschreiben. Aus diesem Grund wurde das Konzept der nicht-linearen Zeitreihenanalyse für die Analyse atmosphärischer Winddaten und insbesondere für die Vorhersage nicht-linearer Effekte, wie Windböen, nicht in Betracht gezogen.

[0007] Es ist auch bekannt, stochastische Prozesse mit sog. Markov-Regeln zu beschreiben. Bei einem Markov-Prozess m-ter Ordnung genügen die letzten m Messwerte zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeitsverteilung des vorherzusagenden Wertes. Im Gegensatz zu deterministischen Prozessen besitzt man bei einem Markov-Prozess also nicht die Kenntnis über den exakten Wert der zukünftigen Beobachtung, sondern lediglich über deren Wahrscheinlichkeitsverteilung.

[0008] Es besteht ein Interesse an der Verarbeitung von Strömungsparametern, um aktuelle Systemzustände erfassen oder in naher Zukunft auftretende Zustände möglichst genau vorhersagen zu können. So werden bspw. Windstromgeneratoren je nach den Wetterverhältnissen bei möglichst hoher Leistung und bis zu möglichst hohen Windgeschwindigkeiten betrieben, um eine optimale Energieumwandlung zu erzielen. Oberhalb einer bestimmten Windgeschwindigkeit muss ein Windstromgenerator jedoch zur Vermeidung von mechanischen Beschädigungen gebremst werden. Dieses Abbremsen erfolgt typischerweise elektrisch durch Regelung des Generatorwiderstandes oder mechanisch durch Verstellen der Rotorblätter des Windstromgenerators. Diese Regelung erfolgt bislang auf der Grundlage der gemessenen momentanen Windgeschwindigkeit bei Notstopps oder auf der Basis der momentanen Leistung des Generators für die permanente Regelung. Die Regelung erfolgt aufgrund der Trägheit des Rotors und wegen Zeitverzögerungen im Mess- und Auswertungssystem immer verspätet. Insbesondere bei Windböen kann dies zu einem starken Anstieg der momentanen mechanischen Belastung der Anlage führen. Könnte man diese abrupten Erhöhungen der Windgeschwindigkeit vorhersagen, so ließe sich die Belastung der Anlage reduzieren und/oder die Effektivität der Energieumwandlung steigern. Letzteres wäre durch die Betreibung der Anlage bei höherer durchschnittlicher Leistung möglich.

[0009] Um auch bei Windböen, also kurzzeitigen turbulenten Erhöhungen der Windgeschwindigkeit, die Sicherheit der Anlage zu gewährleisten, muss das Abbremsen bereits bei einer relativ niedrigen mittleren Windgeschwindigkeit erfolgen. Dies bedeutet im zeitlichen Mittel des Dauerbetriebs eine Beschränkung der Effektivität der Energieumwandlung. Könnte der Strömungszustand der Luft in einer realen Situation genauer erfasst und vorhergesagt werden, so ließe sich die Effektivität der Stromerzeugung sowie die Lebensdauer der Turbine deutlich erhöhen.

[0010] Eine Lösung des genannten Problems wäre theoretisch durch direkte Messung der Windgeschwindigkeit mit Abstand vom Windstromgenerator denkbar. Diese Idee weist jedoch in der Praxis einige wesentliche Nachteile auf. Zunächst erfordert sie aufwendige Hardware-Modifikationen. Es wäre ein ganzes Array von Messstationen nötig, da der Wind zu unterschiedlichen Zeiten aus verschiedenen Richtungen und mit verschiedenen mittleren Windgeschwindigkeiten weht. Eine weitere Schwierigkeit dieser Idee liegt in der Tatsache begründet, dass sich hydrodynamische Turbulenz gerade nicht durch eine gerichtete Translation stationärer Ereignisse auszeichnet, sondern ein dynamisches Phänomen ist. Böen können von verschiedenen Richtungen her anlaufen und sich am Ort der Turbine verstärken oder abschwächen.

[0011] Der Wunsch nach Erfassung lokaler Turbulenzen in der Atmosphäre besteht nicht nur beim Betrieb und der Netzanbindung von Windstromgeneratoren, sondern auch bei anderen Geräten, die empfindlich auf natürlich (Wind) oder künstlich erzeugte Wirbel oder Turbulenzen reagieren (z. B. im Flughafen- oder Baustellenbereich).

[0012] Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur Verarbeitung von Strömungsparametern anzugeben, das die Feststellung und/oder Vorhersage von Geschwindigkeitsänderungen in strömenden Medien mit erhöhter Vorhersagegenauigkeit ermöglicht. Die Aufgabe der Erfindung ist es auch, eine Vorrichtung zur Umsetzung des Verfahrens und Anwendungen bei der Steuerung von Windstromgeneratoren und deren Integration in Stromversorgungsnetze anzugeben.

[0013] Diese Aufgaben werden durch Verfahren und Vorrichtungen mit den Merkmalen gemäß den Patentansprüchen 1 bzw. 12 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

[0014] Die Grundidee der Erfindung besteht in der Verarbeitung von Strömungsdaten eines strömenden Mediums mit den folgenden Schritten. Es wird laufend aufeinanderfolgend mindestens ein Strömungsparameter gemessen, der für die Geschwindigkeit des Mediums charakteristisch ist, und aus den Messwerten eine jeweils fortgeschriebene Zeitreihe gebildet, deren letztes Element dem gerade gemessenen Strömungsparameter entspricht. Wenn der oder die Strömungsparameter an einem Ort im Medium gemessen wird, ist die Zeitreihe skalar (univariate Ausführungsform). Bei Messung an verschiedenen Orten ist die Zeitreihe vektoriell (multivariate Ausführungsform). Jede Zeitreihe wird einer Vorhersageprozedur zur Erzeugung von Vorhersagewerten (oder: Vorhersagedaten) für die jeweils folgenden Strömungsparameter unterzogen. Die Vorhersageprozedur basiert auf dem nicht-linear deterministischen Modell. Aus der Vorhersageprozedur werden Vorhersagewerte zur Charakterisierung des wahrscheinlichen Systemverhaltens in der Folgezeit abgeleitet und/oder für weitere Verarbeitungsschritte bereitgestellt. Wenn die Vorhersagedaten für eine kommende Änderung der Strömungsgeschwindigkeit, z. B. für das kommende Einlaufen einer Turbulenz, charakteristisch sind, wird mindestens ein Steuersignal erzeugt, das angezeigt und/oder zur Auslösung bestimmter Systemreaktionen verwendet wird. Als Kriterium für eine kommende Turbulenz kann die Amplitude der vorhergesagten Geschwindigkeit oder die vorhergesagte Geschwindigkeitsänderung verwendet werden.

[0015] Die erfindungsgemäße Steuersignalerzeugung mit dem nicht-linear deterministischen Vorhersagemodell ermöglicht vorteilhafterweise eine deutliche Verringerung des Vorhersagefehlers. Dies stellt ein überraschendes Ergebnis dar, war man doch bisher davon ausgegangen, daß das Vorhersagemodell nicht optimal an die Dynamik von Systemen mit turbulenten Strömungen angepaßt wäre. Es wurde aber festgestellt, daß die im zeitlichen Mittel erheblichen Vorher-

sagefehler der an sich bekannten Vorhersageprozedur vermindert werden, wenn nur die Vorhersagen im Bereich starker Geschwindigkeitssteigerungen in Betracht gezogen werden oder wenn über mehrere zeitgleiche Vorhersagen gemittelt werden kann.

- [0016] Ein wichtiger Gesichtspunkt der Erfindung ist die Erkenntnis, dass die hier verwendeten Vorhersagemethoden der nicht-linearen Zeitreihenanalyse auch zur Beschreibung einer bestimmten Klasse stochastischer Prozesse, nämlich Markov-Prozesse, angewendet werden darf. Die Erfindung basiert insbesondere auf der Feststellung, dass erfindungsgemäß verwendete lokal konstante Vorhersagemodelle optimal für die Bestimmung von Markov-Regeln in stochastischen Prozessen geeignet sind. Die Erfinder haben erkannt, dass sich die Inkremente der Windgeschwindigkeiten gut durch nicht-lineare Markov-Prozesse in der Zeit beschreiben lassen und somit Modelle der nicht-linearen Zeitreihenanalyse gut zur Vorhersage der Erwartungswerte der Inkremente geeignet sind. Diese Eigenschaft führt zu besonders vorteilhaftem Verhalten in Situationen, wo mehrere Vorhersagen zum selben Zeitpunkt getroffen werden und über die Vorhersagewerte gemittelt wird. Dies ist z. B. bei der Integration von erneuerbaren Energieträgern in Stromversorgungsnetze der Fall.
- [0017] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die Bewegung strömender Luftmassen erfasst. Die Strömungsparameter des Mediums Luft (Winddaten) umfassen insbesondere die Windgeschwindigkeit oder davon abgeleitete Größen. Als abgeleitete Größe kann auch bspw. die Abweichung eines aktuell gemessenen Wertes der Windgeschwindigkeit vom zeitlichen Mittel verwendet werden. Besonderes Interesse besteht an Vorhersagen von turbulenten Windströmungen (Böen) für kurze Zeiträume (wenige bis z. B. 20 Sekunden) oder allgemein bevorstehenden Geschwindigkeitsänderungen für längere Zeiträume (bis zu einige Minuten).
- [0018] Gemäß einer bevorzugten Anwendung der Erfindung werden die Vorhersagedaten verwendet, um Betriebsparameter einer im strömenden Medium angeordneten mechanischen Einrichtung, z. B. eines Windstromgenerators, einzustellen oder zu regeln. Bei einem Windstromgenerator ist vorzugsweise die Bereitstellung einer auf dem oben beschriebenen Verfahren basierenden Steuerung vorgesehen. Wenn die Vorhersagedaten des nicht-linear deterministischen Modells eine hohe Windgeschwindigkeit oder Windgeschwindigkeitsänderung ergeben, so wird mit dem genannten Steuerungssignal eine Stelleinrichtung des Windstromgenerators betätigt, mit der ein zumindest vorübergehendes Abbremsen des Generators ausgelöst wird. Diese Regelung besitzt den Vorteil, dass auf gefährliche Turbulenzen rechtzeitig mit erhöhter Zuverlässigkeit reagiert und damit die mittlere mechanische Belastung der Anlage reduziert werden kann und der Generator bis zu einer höheren mittleren Windgeschwindigkeit betrieben werden kann.
- [0019] Eine weitere bevorzugte Anwendung der Erfindung betrifft die Integration von erneuerbaren Energiequellen in größere Stromversorgungsnetze. Wenn bspw. eine hohe Anzahl von Windstromgeneratoren Leistung in ein Versorgungsnetz einspeisen und die zukünftig produzierte Leistung vorhergesagt werden soll, ist es weniger wichtig, eine exakte Vorhersage für jede einzelne Turbine zu besitzen, als eine gute Abschätzung des Mittelwertes der vorherzusagenden Leistung zu erhalten. Wenn z. B. eine Erhöhung der Leistungsabgabe um 10% von einer Anzahl von N Generatoren vorhergesagt wird, ist es nicht wichtig, dass die Leistung jeder einzelnen Turbine um 10% steigt. Vielmehr ist es für den Stromversorger von Bedeutung, dass sich die Leistung im Mittel um den vorhergesagten Wert erhöht.
- [0020] Unter der Annahme, dass die Windgeschwindigkeit einem Markov-Prozess genügt und dass die Markov-Regeln für verschiedene Gruppen von Generatoren identisch sind, ist ein lokal konstantes Modell optimal an das Problem der Vorhersage der mittleren Leistungsabgabe von Windturbinen angepasst.
- [0021] Gegenstand der Erfindung ist auch eine Vorrichtung zur Strömungsdatenverarbeitung, die zur Ausführung des o. g. Verfahrens eingerichtet ist und insbesondere eine Messeinrichtung zur Erfassung der gewünschten Strömungsparameter, eine Recheneinrichtung zur Erstellung und Verarbeitung der Zeitreihen, eine Vergleichereinrichtung zum Vergleich der Systembedingungen und/oder Vorhersagewerte mit vorbestimmten Referenzkriterien und eine Ausgabereinrichtung für Vorhersagewerte und/oder davon abgeleitete Steuersignale umfasst.
- [0022] Die Erfindung wird mit besonderem Vorteil zur Steuerung von Windgeneratoren umgesetzt. Dabei ist auch die besondere Situation in Windfarmen ausnutzbar. In einer Windfarm werden mehrere Windgeneratoren in geringem räumlichen Abstand, typischerweise unter 100 m, betrieben. Diese Generatoren liefern simultan aufgezeichnete Werte der Leistungen bzw. der Windgeschwindigkeit. Diese multivariate, vektorwertige Zeitreihe kann ebenso wie eine einzelne Zeitreihe zur Lösung des oben geschilderten Vorhersageproblems genutzt werden. Gegenstand der Erfindung ist somit auch die Bearbeitung von Strömungsdaten unter Verwendung der gesamten räumlichen Information, wie sie in Windfarmen zur Verfügung steht. Auf die Verarbeitung der vektorwertigen Zeitreihen wird weiter unten eingegangen.
- [0023] Die Anwendung ist nicht auf bestimmte Zeithorizonte beschränkt. Da die Geschwindigkeitsdaten bei Turbulenzen oder langsameren Geschwindigkeitsänderungen des Windes im Zeitverlauf selbstähnliche Strukturen zeigen können die Prinzipien bei beliebigen Zeithorizonten angewendet werden, wobei ggf. entsprechend angepasst erweiterte Zeitreihen ausgewertet werden.
- [0024] Die Erfindung besitzt zahlreiche Vorteile, die einerseits unmittelbar mit der Verringerung des Vorhersagefehlers bei der Charakterisierung strömender Medien und andererseits davon abgeleitet mit wirtschaftlichen Vorteilen beim Betrieb technischer Systeme in oder mit den strömenden Medien zusammenhängen. Weitere Vorteile bestehen darin, dass zuverlässige Vorhersagen mit einem relativ geringen Rechenaufwand erzielt werden können, so dass erfindungsgemäße Einrichtungen zur Systemvorhersage oder -steuerung problemlos in vorhandene Systeme integriert werden können. Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung der beigefügten Zeichnungen. Es zeigen:
- [0025] Fig. 1 eine schematische Illustration der erfindungsgemäßen Steuerung eines Windstromgenerators,
- [0026] Fig. 2 eine Kurvendarstellung einer Zeitreihe von Windgeschwindigkeitsdaten,
- [0027] Fig. 3 Kurvendarstellungen zum Vergleich der Vorhersagefehler verschiedener Vorhersagemodelle,
- [0028] Fig. 4 eine Kurvendarstellung zur Abhängigkeit des Vorhersagefehlers des nicht-linear deterministischen Modells von der aktuellen Windgeschwindigkeitsänderung,
- [0029] Fig. 5a-d Kurvendarstellungen zur weiteren Charakterisierung der Vorhersagemodelle,
- [0030] Fig. 6 eine Kurvendarstellung des Zeitverlaufes einer Windböe,
- [0031] Fig. 7 ein Flussdiagramm zur Illustration einer Ausführungsform der Erfindung,
- [0032] Fig. 8 ein Diagramm zur Klassifizierung von Windböen, und

[0033] Fig. 9 eine Schemadarstellung der Aufnahme von Strömungsdaten bei Verarbeitung multivariater Zeitreihen.

[0034] Die Erfindung wird im Folgenden unter Bezug auf Anwendungen bei der Böenvorhersage in bodennahen Luftströmungen erläutert, ohne jedoch darauf beschränkt zu sein. Die Erfindung ist mit angepassten Messverfahren, Referenzkriterien und dgl. analog bei der Turbulenzvorhersage in anderen gasförmigen oder auch flüssigen Medien anwendbar, sofern das jeweilige System entsprechende kohärente nicht-lineare Effekte zeigt.

[0035] Die mit einem Schalenkreuz-Windmesser 2 eines Windgenerators (siehe Fig. 1) über vierundzwanzig Stunden aufgenommenen Windgeschwindigkeiten in einer ebenen, küstennahen Landschaft sind beispielhaft in Fig. 2 gezeigt. Der Windmesser war in einer Höhe von zehn Metern über dem Boden angebracht und wurde mit einer Abtastrate von 8 Hz abgefragt. Die Messwerte ergeben eine Zeitreihe, die auf allen Zeitskalen stochastisch strukturiert ist. Die gemessenen Werte der Windgeschwindigkeit bilden die beim erfindungsgemäßen Verfahren verarbeiteten Strömungsparameter. Die Windgeschwindigkeiten sind skalare Größen  $s_n$ , die eine Zeitreihe  $\{S_k\}$  bilden. Bei abgewandelten Anwendungen der Erfindung können die Elemente der Zeitreihen auch vektorielle Größen sein. Zur Analyse von Zeitreihen stehen die folgenden Vorhersagemodelle zur Verfügung.

#### Illustration und Vergleich der Vorhersagemodelle

[0036] (i) Zur herkömmlichen linear-stochastischen Vorhersage wird bspw. ein autoregressives Modell (AR-Modell) verwendet. Beim AR-Modell ist der gegenwärtige oder jüngste Wert einer Zeitreihe gemäß Gleichung (1) die Summe aus einer Linearkombination von früheren Werten und einem additivem Rauschen.

$$s_n = \sum_{j=1}^{M_{AR}} A_j s_{n-j} + b + \eta_n \quad (1)$$

[0037] Dabei sind  $M_{AR}$  die Ordnung oder Dimension des AR-Modells,  $A_j$  und  $b_j$  die Parameter der Linearkombination,  $j$  und  $n$  natürliche Zahlen zur Benennung des jeweiligen Zeitreihenwertes und  $\eta_n$  den Rauschanteil entsprechend einem weißen Gauss-Rauschen. Die Parameter des AR-Modells werden gemäß Gleichung (2) durch die Minimierung des Vorhersagefehlers ermittelt, wobei dann der Index  $k$  in Gleichung (2) über die gesamte Trainingsmenge läuft. Die Trainingsmenge kann im Rahmen eines adaptiven AR-Modells variiert werden und umfasst bei den hier betrachteten Beispielen die letzten sieben Stunden der Zeitreihe. Die Ordnung  $M_{AR}$  der Modelle muss anwendungsabhängig je nach der Aufgabenstellung gewählt werden. Linear-stochastische Modelle, wie z. B. das AR-Modell, sind an sich bekannt.

[0038] Ein essentiell lineares Verfahren ist auch durch den bekannten, sogenannten Kallman-Filter gegeben, der jedoch keine Trennung von Systemzuständen im nicht-linear deterministischen Sinne erlaubt.

[0039] (ii) Bei der erfindungsgemäß verwendeten nicht-linear deterministischen Vorhersage werden die Zustände  $x$  eines dynamischen Systems durch eine Bewegungsgleichung gemäß  $x_{n+1} = F(x_n)$  in einem Zustandsraum beschrieben. Die Bewegungsgleichung bzw. nicht-lineare Abbildung ist in der Regel eine komplizierte Differentialgleichung. Falls die Funktion  $F$  nicht bekannt ist, kann sie jedoch aus langen Zeitreihen von Zuständen  $\{x_k\}$ ,  $k = 1, \dots, N$ , durch Betrachtung sämtlicher Zustände  $y_k$  in einer Umgebung (oder: Nachbarschaft)  $U_n$  eines Zustands  $x_n$  und Minimierung der Funktion (2) linear angenähert werden.

$$\epsilon_n^2 = \sum_{k: y_k \in U_n} (A_n y_k + b_n - y_{k+s})^2 \quad (2)$$

[0040] Die Größe  $\epsilon_n^2$  stellt einen Vorhersagefehler in Bezug auf die Faktoren  $A_n$  und  $b_n$  dar. Der implizite Ausdruck  $A_n y_k + b_n - y_{k+s} = 0$  illustriert, dass die Werte, die der oben genannten Bewegungsgleichung entsprechen, auf eine Hyperebene innerhalb des betrachteten Zustandsraumes beschränkt sind. Der Vorhersagefehler kann entsprechend dem von J. D. Farmer (siehe oben) beschriebenen Verfahren ("Farmer-Sidorowich-Verfahren") minimiert werden. Die Faktoren der Linearkombination bei minimalem Vorhersagefehler erlauben wiederum die Ermittlung des Vorhersagewertes  $x_{n+s}$  aus der vorhergehenden Zeitreihe.

[0041] Das Verfahren, das bei der Umsetzung der Erfindung im univariaten Fall verwendet wird, basiert auf der Tatsache, dass bei den vorliegenden Zeitreihen aus Winddaten nur eine Folge von Skalarwerten  $s_n$  aufgezeichnet wird. Aus diesen werden die zu rekonstruierenden Phasenraumvektoren mit dem Konzept der Zeitversatzvektoren ermittelt, wie es im Einzelnen von F. Takens unter dem Titel "Detecting Strange Attractors in Turbulence" in "Lecture Notes in Math", Bd. 898, Springer, New York, 1981, oder von T. Sauer et al. in "J. Stat. Phys.", Bd. 65, 1991, S. 579, und illustrativ im Folgenden beschrieben wird. Diese Publikationen werden hiermit vollständig in die vorliegende Beschreibung einbezogen.

[0042] In einem multivariaten AR-Modell können die Werte  $s_n$  auch Messwerte anderer Größen sein, z. B. die Windgeschwindigkeit an anderen Messorten.

[0043] Ausgehend von einer skalaren Zeitreihe  $\{s_k\}$  werden Zeitversatzvektoren in einem  $m$ -dimensionalen Raum gemäß  $\hat{s}_n = (s_n, s_{n-\tau}, \dots, s_{n-(m-1)\tau})$  gebildet ( $n$ : laufender Index der Zeitreihe). Wenn eine multivariate Zeitreihe gemessen wird, kann  $\hat{s}_n$  auch aus den verschiedenen Komponenten der vektorwertigen Zeitreihe gebildet werden. Der Parameter  $m$  ist die Einbettungsdimension der Zeitversatzvektoren. Die Einbettungsdimension wird anwendungsabhängig gewählt und ist größer als der doppelte Wert der fraktalen Dimension des Attraktors des betrachteten dynamischen Systems. Der Parameter  $\tau$  ist ein Abtastabstand (oder: "time lag"), der den zeitlichen Abstand der aufeinanderfolgenden Elemente der Zeitreihe darstellt. Der Zeitversatzvektor ist somit ein  $m$ -dimensionaler Vektor, dessen Komponenten einen bestimmten Zeitreihenwert und die  $(m-1)$  vorhergehenden Zeitreihenwerte umfassen. Er beschreibt die zeitliche Entwicklung des Systems während eines Zeitbereichs oder Einbettungsfensters der Dauer  $m \cdot \tau$ . Mit jedem neuen Abtastwert verschiebt sich das Einbettungsfenster innerhalb der gesamten zeitlichen Entwicklung jeweils um einen Abtastabstand. Der Abtastabstand  $\tau$  ist wiederum eine anwendungsabhängig gewählte Größe. Falls sich das System wenig ändert, kann der Abtast-

abstand größer gewählt werden, um die Verarbeitung redundanter Daten zu vermeiden. Falls sich das System schnell ändert, muß der Abtastabstand geringer gewählt werden, da andernfalls die Korrelationen, die zwischen benachbarten Werten auftreten, Fehler in die weitere Verarbeitung einführen würden. Die Wahl des Abtastabstandes  $\tau$  ist somit ein Kompromiß zwischen der Redundanz und der Korrelation zwischen aufeinanderfolgenden Zuständen. Zur Turbulenzvorhersage werden die Parameter  $m$  und  $\tau$  in geeigneter Weise nach den Prinzipien, die von J. F. Gibson et al. in "Physica D", Band 57, 1992, Seite 1 ff. beschrieben werden, gewählt. Diese Publikation wird hiermit ebenfalls durch Bezugnahme in die vorliegende Beschreibung eingeführt.

[0044] Der Vorhersagewert  $x_{n+s}$  kann nach Gleichung (2) aus der linearen Approximation der nicht-linearen Funktion  $F$  ermittelt werden. Danach gilt in linearer Näherung  $x_{n+s} = A_n \cdot x_n + b_n$ . Erfindungsgemäß wird als nullte Näherung ein lokal konstantes Phasenraummodell betrachtet. Mit dem lokal konstanten Modell ist der Vorhersagewert  $x_{n+s}$  einfach der Mittelwert aus den Zukunftswerten der Phasenraumnachbarn  $y_n$  der Zustände  $x_n$  gemäß

$$x_{n+s} = \sum_{k: y_k \in U_n} y_{k+s}$$

[0045] Wird anstelle einer skalaren Zeitreihe eine vektorwertige Zeitreihe gemessen, so können die einzelnen Komponenten des Phasenraumvektors auch aus den Komponenten der vektorwertigen Zeitreihe (z. B. Windgeschwindigkeiten, die an verschiedenen benachbarten Generatoren gemessen worden sind) gebildet werden. Es ist auch eine Kombination von Zeitversatzeinbettung und Nutzung der vektorwertigen Information der Zeitreihe möglich.

[0046] (iii) Die Anwendung der genannten Vorhersagemodelle zur Turbulenzvorhersage an einer univariaten Zeitreihe von Winddaten ist in Fig. 3 ausschnittsweise illustriert. Für das linear-stochastische AR-Modell wurde  $M_{AR} = 20$  und für die nicht-linear deterministische Analyse wurde  $\tau = 0,125$  s und ein 20-dimensionaler Verzögerungsvektor gewählt. Es wurden mindestens fünfzig Nachbarwerte berücksichtigt. Die Vorhersagezeit beträgt vierzig Messschritte bzw. fünf Sekunden. Diese Parameter werden nur beispielhaft gegeben. Je nach der Situation können die Parametereinstellungen variiert werden.

[0047] Fig. 3 zeigt den aus der Zeitreihe gemäß Fig. 2 ermittelten Vorhersagefehler für beide Modelle in Abhängigkeit von der Zeit. Es ist erkennbar, dass das (globale) linear-stochastische Modell (gestrichelt gezeichnet) bei geringen Vorhersagefehlern, wenn das System in einem nicht-turbulenten Zustand ist, ähnliche oder bessere Ergebnisse im Vergleich zum (lokalen) nicht-linear deterministischen Modell (durchgezogen gezeichnet) liefert. Geringe Vorhersagefehler bedeuten geringe Windgeschwindigkeitsänderungen, so dass die Minima in der Kurvendarstellung gemäß Fig. 3 den nicht-turbulenten Bereichen entsprechen. Andererseits ergibt in turbulenten Bereichen bei großen Vorhersagefehlern das nicht-linear deterministische Modell wesentlich bessere, d. h. relativ geringere, Vorhersagefehler als das linear-stochastische Modell.

[0048] Auf diesem Befund basiert das erfindungsgemäße Verfahren. Aus den gemessenen Zeitreihen von Winddaten (z. B. Windgeschwindigkeiten) werden laufend Vorhersagewerte als Differenzwerte zwischen den vorhergesagten Daten und der Persistenz ermittelt. Je nachdem, ob der aktuelle Vorhersagewert unterhalb oder oberhalb einer anwendungsabhängig eingestellten Grenze (Schwellwert) liegt, wird eine Böe vorhergesagt bzw. ein Steuersignal erzeugt. Allgemein ist vorgesehen, dass das Steuersignal erzeugt wird, wenn die Abweichung des Vorhersagewertes einer Zeitreihe vom aktuellen Wert des betrachteten Signals größer als der Schwellwert ist (siehe auch Fig. 5a bis c). Der Schwellwert zur Böenvorhersage liegt beispielsweise im Bereich von 1 bis 2 m/s.

[0049] Das in Fig. 3 illustrierte Ergebnis wird auch durch die Fig. 4, 5a und 5b bestätigt. Fig. 4 zeigt die relative Verbesserung des nicht-linearen deterministischen Modells im Vergleich mit dem linear-stochastischen Modell, die durch den Parameter  $I = (\epsilon_{AR} - \epsilon_{NL})/\sigma$  beschrieben wird, in Abhängigkeit von der Abweichung  $d$  des vorherzusagenden Wertes von der Persistenz. Dabei sind  $\epsilon_{AR}$  der Vorhersagefehler des AR-Modells und  $\epsilon_{NL}$  der Vorhersagefehler des nicht-linearen Modells. Die Einheit der Größe  $d$  ist entsprechend dem gemessenen Geschwindigkeitssignal [m/s]. Bei geringen  $d$ -Werten ist der Parameter  $I$  der Verbesserung negativ, d. h. das linear-stochastische Modell liefert eine bessere Vorhersage als das nicht-lineare deterministische Modell. Bei großen  $d$ -Werten ist das Verhältnis umgekehrt.

[0050] Fig. 5a zeigt den Parameter  $I$  des mittleren relativen Unterschieds (Verbesserung der Vorhersage) in Abhängigkeit von verschiedenen Schwellwerten  $D$  bei Vorhersagen des jeweiligen Folgewertes mit dem linear-stochastischen Modell (durchgezogen gezeichnet) bzw. mit dem nicht-linear deterministischen Modell (gestrichelt gezeichnet). Insbesondere für vorhergesagte große Steigerungen der Windgeschwindigkeit ist die erfindungsgemäße Vorhersageverbesserung unter Verwendung des nicht-linearen Modells in der Größenordnung der Varianz der Daten. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil der Erfindung dar.

[0051] In Fig. 5b ist die Gesamtzahl  $N$  von Situationen, in denen das Steuersignal korrekterweise erzeugt bzw. die Böe korrekterweise vorhergesagt wird, in Abhängigkeit vom Schwellwert  $D$  illustriert. Es zeigt sich, dass kleine Geschwindigkeitsänderungen, die relativ häufig auftreten, gewöhnlich durch beide Modelle vorhergesagt werden. Die Mehrzahl der großen Schwankungen wird jedoch nur durch das nicht-linear deterministische Modell vorhergesagt. Auf diesem Ergebnis basiert die erfindungsgemäße Verwendung des nicht-linearen Modells zur Vorhersage von Windböen.

[0052] Bei negativen Geschwindigkeitsänderungen, d. h. bei einer Verringerung der Windgeschwindigkeit, ergibt sich ein anderes Verhalten, das in Fig. 5c illustriert ist. Beim Abflauen des Windes wird keine Verbesserung des deterministischen Modells gegenüber dem stochastischen Modell erzielt.

[0053] Fig. 5d zeigt, dass ein lokal konstantes Modell tatsächlich den Erwartungswert der positiven Geschwindigkeitsänderung sehr genau vorhersagt, wogegen ein lineares Modell die Geschwindigkeitsänderungen systematisch unterschätzt. Hierzu ist in Fig. 5d die tatsächliche mittlere Geschwindigkeitsänderung  $s_{n+s} - s_n$  gegenüber der vorhergesagten Erhöhung der Geschwindigkeit  $\hat{s}_{n+s} - s_n$  aufgetragen. Die gestrichelte Linie entspricht der Beobachtung für das lokal konstante Modell und die durchgezogene Linie der für das lineare Modell. Außerdem ist die Diagonale eingezeichnet, auf der die mittleren Geschwindigkeitsänderungen idealerweise liegen sollten. Es wird deutlich, dass die mittleren Geschwindigkeitsfluktuationen wesentlich stärker sind als durch ein lineares Modell vorhergesagt. Die gute Vorhersage der

mittleren Fluktuationen durch das lokal konstante Modell zeigt, dass die turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen tatsächlich der Markov-Eigenschaft genügen.

#### Steuerung eines Windgenerators

[0054] Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass mit dem nicht-linear deterministischen Vorhersagemodell die Vorhersage wesentlich verbessert werden kann. Als Auslöser für die Böenvorhersage kann neben der erwähnten Vergrößerung des Vorhersagewertes über einen vorbestimmten Grenzwert alternativ auch der (vorhergesagte) Zeitverlauf der Windgeschwindigkeit an sich verwendet werden. Letzteres basiert auf der Feststellung typischer Geschwindigkeitsverläufe beim Aufbau einer Turbulenz oder Böe.

[0055] Ein typischer Geschwindigkeitsverlauf von Windböen ist zur Illustration in Fig. 6 dargestellt (siehe "Wind Conditions for Wind Turbine Design", International Energy Agency, 2<sup>nd</sup> Symposium, April 1999, ISSN 0590-8809). Ausgehend von einer mittleren Geschwindigkeit ergeben sich zunächst ein Minimum, dann ein Anstieg zu einem starken Maximum mit einem erneuten Abfall zu einem Minimum und schließlich ein Anstieg zu der mittleren Geschwindigkeit. Der für die Vorhersage interessierende Zeitbereich kann bei der Turbulenzvorhersage der Durchlauf des ersten Minimums sein. In diesem Zeitbereich verändert sich der o. g. Zeitversatzvektor in bestimmter Weise. Sobald dies durch Vergleich mit den Nachbarn im Phasenraum festgestellt wird, erfolgt die Böenvorhersage. Eine Böenvorhersage kann aber auch auf anderen Zeitbereichen basieren. Zur Steuerung eines Windgenerators 1, der schematisch in Fig. 1 dargestellt ist, wird laufend mit einem Windmesser 2 die Windgeschwindigkeit gemessen, die gemessenen Geschwindigkeitsdaten mit dem unten unter Bezug auf Fig. 7 erläuterten Verfahren ausgewertet und eine Verstellung der Betriebsparameter des Windgenerators 1 nach Vorhersage einer Böe vorgenommen. Ein Verstellen der Betriebsparameter bedeutet, dass bspw. die Anstellwinkel der Rotorblätter 3 verändert (z. B. um 1°) oder die Rotorgeschwindigkeit elektrisch abgebremst wird. Zur Durchführung des Verfahrens gemäß Fig. 7 ist eine Einrichtung 4 zur Verarbeitung der Winddaten vorgesehen, deren Einzelheiten unten genannt werden.

[0056] Gemäß dem Flussdiagramm in Fig. 7 erfolgt laufend eine Messung der Windgeschwindigkeit mit dem Windmesser 2 (Schritt 101). Die Windgeschwindigkeit oder davon abgeleitete Größen, wie z. B. die Änderung der Windgeschwindigkeit oder Zeitversatzvektoren aus den Zeitreihen, werden bei Schritt 102 einer Verarbeitung zur Erstellung eines charakteristischen Vorhersagewertes unterzogen, der bei Schritt 103 mit einem vorbestimmten Referenzkriterium (Schwellwert) verglichen wird. Die Winddatenverarbeitung bei Schritt 102 wird vorzugsweise unter Verwendung eines sog. Box-Algorithmus ausgeführt (siehe H. Kantz et al. in "Nonlinear Time Series Analysis", Cambridge University Press, Cambridge, 1997, Kapitel 4), mit dem die Zahl der in Echtzeit auszuwertenden Daten von ca. 150.000 auf einige hundert Punkte reduziert werden. Der Box-Algorithmus ist ein Algorithmus zur schnellen Nachbarsuche in n-Dimensionen ("box assisted search").

[0057] Wenn der Schwellwertvergleich 103 die Vorhersage geringer Windgeschwindigkeiten oder niedrigen Turbulenzen ergibt, so erfolgt der Rücksprung zu Schritt 101. Wenn jedoch der Schwellwertvergleich 103 eine starke Abweichung von der Persistenz oder von niedrig-turbulenten Zuständen ergibt, so wird das Steuersignal zum Abbremsen des Windgenerators erzeugt (Schritt 104). Bei abgewandelten Anwendungen kann auch die Erzeugung eines Warn- oder Anzeigesignals vorgesehen sein. Anschließend erfolgt eine erneute Geschwindigkeitsmessung 105 und bei Schritt 106 ein Vergleich mit dem Vorhersagewert.

[0058] Wird beim Vergleich 106 die vorhergesagte Böe bestätigt, so folgt ein Warte- oder Verzögerungsschritt 107. Während des Schrittes 107 wird der Generator im abgebremsten Zustand betrieben. Dies erfolgt entsprechend Erfahrungswerten in einem Zeitbereich von ca. 1 bis 5 Sekunden. Anschließend erfolgt ein Rücksprung zu Schritt 105. Wird beim Vergleich 106 die vorhergesagte Böe nicht bestätigt, so erfolgt bei Schritt 108 die Rückstellung des Generators in den nicht-abgebremsten Zustand und der Rücksprung zur Schritt 101.

[0059] Zur Umsetzung dieser Prozedur enthält die Einrichtung 4 (siehe Fig. 1) eine Recheneinheit zur Ermittlung des Vorhersagewertes (Schritt 102), eine Vergleichereinheit zur Umsetzung des Vergleichsschrittes 103 und zur Vorhersage einer Windböe, eine Stelleinrichtung zum Abbremsen (104) des Generators, und eine weitere Vergleichereinheit (Schritt 106) mit einer Takttschaltung (Schritt 107). Die Stelleinrichtung umfasst insbesondere Stellantriebe zur Veränderung des Anstellwinkels der Generatorflügel 3 oder elektrische Stelleinrichtungen zur Erhöhung des elektrischen Widerstandes des Generators. Diese Stelleinrichtungen werden durch elektronische Regelkreise zur verstärkten Leistungsauskopplung aus dem Generator gebildet. Die Windböen können entsprechend bestimmter Geschwindigkeitskriterien in verschiedene Böenklassen (z. B. von 1 bis 10) eingeteilt werden. Fig. 8 verdeutlicht einen wichtigen Vorteil der Erfindung anhand der Anzahl der in verschiedenen Böenklassen vom Windgenerator erfassten Windböen. Wird eine Windböe in einer Klasse mit dem erfindungsgemäßen Verfahren korrekt vorhergesagt, so wird der Windgenerator rechtzeitig abgebremst. Es erfolgt keine ggf. gefährliche Erhöhung der Umlaufgeschwindigkeit des Rotors, d. h. die Windböe wird vom Generator nicht erfasst. Die Zahl der erfassten Windböen wird in jeder Böenklasse erheblich vermindert (A: Anzahl ohne Vorhersagemodell, B: Anzahl mit erfindungsgemäß angewendetem Vorhersagemodell).

[0060] In allen Böenklassen werden weniger Böen erfasst. In den Klassen mit den höchsten Windgeschwindigkeiten, die also besonders gefährlich sind, kann die Zahl der erfassten Böen auf Null reduziert werden. Dementsprechend kann der Windgenerator bei einer mittleren Umlaufgeschwindigkeit betrieben werden, die einen geringeren Sicherheitsabstand zu den gefährlichen Böenwerten lässt. Es ergibt sich eine erhöhte Effektivität des Generatorbetriebs. Die Effektivitätserhöhung kann wie folgt abgeschätzt werden. Mit der Windgeschwindigkeit steigt die Generatorleistung typischerweise mit  $v^3$ . Wird der Windgenerator im zeitlichen Mittel mit einer stärkeren Anstellung der Rotorblätter betrieben, so ergibt sich eine entsprechende Steigerung der elektrischen Leistung.

[0061] (iv) Im Folgenden wird die Anwendung der genannten Vorhersagemodelle zur Turbulenzvorhersage an einer multivariaten Zeitreihe von Winddaten erläutert. Während bei der univariaten Version lineare Korrelationen des Vorhersagewertes zu mehreren Werten der Zeitreihe in der Vergangenheit ermittelt werden, ist das multivariate Verfahren auf die Auswertung von Korrelationen des Vorhersagewertes mit Werten der Windgeschwindigkeit und -richtung an ver-

schiedenen Raumpunkten gerichtet. Die räumlichen Korrelationen können dabei von der jeweiligen Windrichtung abhängig sein.

[0062] Die nicht-linearen Phasenraummethoden sind geeignet, Nichtstationaritäten implizit zu verarbeiten und dynamisch verschiedenartige Situationen voneinander zu trennen. Diese Eigenschaft verleiht den nicht-linear deterministischen Verfahren eine deutliche Überlegenheit gegenüber linearen Ansätzen in Wettersituationen, in denen beispielsweise die Windgeschwindigkeit variiert. Dies basiert auf der Tatsache, dass zur Abschätzung des Zukunftswertes der Windgeschwindigkeit nur Wettersituationen aus der Vergangenheit berücksichtigt werden, die der aktuellen Situation ähnlich sind, wenn beispielsweise dieselbe mittlere Windrichtung vorherrscht.

[0063] Zur quantitativen Analyse dieses Phänomens wurde eine multivariate Zeitreihe mit 9 simultanen Messungen der Windgeschwindigkeit und 9 Messungen der Windrichtung verwendet. Es ergeben sich 18-dimensionale Einbettungsvektoren bzw. ein AR-Modell der Ordnung 18. Die Messanordnung ist schematisch in Fig. 9 illustriert. Die Windgeneratoren sind flächig in verschieden ausgerichteten Reihen angeordnet. Der Vorhersagefehler wurde für 30000 Zeitpunkte, also etwa 1 Stunde der Zeitreihe ausgewertet. Als Trainingsintervall wurde ein Tag der Zeitreihe verwendet. Bei Vorhersagehorizonten ab etwa 10 Sekunden beträgt die Verbesserung etwa 5%. Der genaue Wert der Verbesserung hängt von der Art der betrachteten Wettersituation ab. In Situationen mit starken Schwankungen der Windrichtung ist die Überlegenheit der nicht-linearen Methoden größer als in Situationen, in denen die Windrichtung annähernd konstant ist. Da die Stärke der Nichtstationarität des Wetters von den jeweiligen geographischen und orographischen Bedingungen abhängt, wird auch die spezifische Leistungsfähigkeit der nicht-linearen Methoden für jeden räumlichen Standort der Anwendung neu zu ermitteln sein.

[0064] Bei der multivariaten Vorhersage von Windgeschwindigkeiten können nicht-lineare Verfahren deutlich überlegen sein. Die genaue Größe der Überlegenheit und der ideale Zeithorizont einer nicht-linearen Vorhersage hängen jedoch noch von der betrachteten Wettersituation, der geographischen Lage und der räumlichen Anordnung der Messinstrumente ab. Beispielsweise ergaben sich bei einem räumlichen Abstand der Sensoren im Bereich von etwa 30 m Vorhersagehorizonte im Sekundenbereich. Bei Zeithorizonten im Minuten- bis Stundenbereich werden Messungen in größerem räumlichen Abstand durchgeführt.

[0065] Die verbesserten Vorhersagen mit dem multivariaten, nicht-linear deterministischen Modell können zur permanenten oder zeitweisen Steuerung verschiedener technischer Abläufe genutzt werden. So können bei der Windenergieumwandlung technische Parameter der Turbine oder ein zusätzliches Diesellaggregat gesteuert werden. Wird eine gesteigerte Windgeschwindigkeit vorhergesagt, ist eine erhöhte Leistung der Windgeneratoren zu erwarten, so dass parallel oder ergänzend betriebene konventionelle Generatoren mit geringerer Leistung betrieben werden können (bzw. umgekehrt). Auf einem größeren Zeithorizont ist auch die Steuerung konventioneller Kraftwerke möglich. Diese Steuerung kann permanent erfolgen oder nur bei vorhergesagten starken Änderungen des Strömungsparameters.

[0066] Die in der vorstehenden Beschreibung, den Zeichnungen und den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausgestaltungen von Bedeutung sein.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Verarbeitung und/oder Vorhersage von Strömungsdaten eines strömenden Mediums, bei dem auslaufend an einem oder verschiedenen Orten im Medium aufeinanderfolgend gemessenen Werten mindestens eines Strömungsparameters, der für die Geschwindigkeit des Mediums charakteristisch ist, eine jeweils fortgeschriebene Zeitreihe gebildet wird, die einer nicht-linear deterministischen Vorhersageprozedur auf der Grundlage eines lokal konstanten Phasenraummodells zur Erzeugung von Vorhersagewerten für die jeweils folgenden Strömungsparameter unterzogen wird, wobei ein vorbestimmtes Steuersignal erzeugt wird, wenn die Vorhersagewerte für eine kommende Änderung der Strömungsgeschwindigkeit charakteristisch sind.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem der Strömungsparameter die Strömungsgeschwindigkeit oder die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit umfasst.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem die Vorhersagewerte vorhergesagte Werte der Strömungsgeschwindigkeit oder der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit umfassen.
4. Verfahren gemäß Anspruch 3, bei dem die Differenz zwischen vorhergesagtem Wert und Persistenz die relevante Stellgröße für nachfolgende Steuerungsverfahren ist.
5. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Strömungsdaten Winddaten einer bodennahen Luftströmung umfassen und das Steuersignal gebildet wird, wenn das Einlaufen einer Windböe oder eine Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit vorhergesagt wird.
6. Verfahren gemäß Anspruch 5, bei dem als Strömungsparameter die Windgeschwindigkeit gemessen und das Einlaufen einer Windböe vorhergesagt wird, wenn die vorhergesagte Abweichung der Windgeschwindigkeit von der Persistenz größer als ein vorbestimmter Schwellwert ist.
7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 5 oder 6, bei dem die Windgeschwindigkeit mit einem Windmesser (2) eines Windgenerators (1) gemessen wird und mit dem bei Vorhersage einer Böe erzeugten Steuersignal ein Abbremsen des Windgenerators ausgelöst wird.
8. Verfahren gemäß Anspruch 7, bei dem das Abbremsen des Windgenerators eine Verringerung des Anstellwinkels der Rotorblätter (3) des Windgenerators und/oder eine elektrische Regelung des Generatorwiderstandes umfasst.
9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 5 bis 8, bei dem als Strömungsparameter an mehreren Orten die Windgeschwindigkeit gemessen und mit einem lokal konstanten Modell vorhergesagt wird und ein Steuersignal erzeugt wird, wenn die vorhergesagte mittlere Abweichung der Windgeschwindigkeit größer als ein Schwellwert ist.
10. Verfahren gemäß Anspruch 9, bei dem mit dem Steuersignal die Einstellung konventioneller Energiewandler auf eine geänderte Leistung bewirkt wird.

11. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Strömungsdaten Windgeschwindigkeiten  $s_n$  gemäß den folgenden Schritten verarbeitet werden:
- a) Erfassung einer Vielzahl von Geschwindigkeitswerten  $s_n$  mit einem Abtastabstand  $\tau$ ,
  - b) Bildung von Zeitversatzvektoren, von denen jeder aus Komponenten  $s_n$  besteht, wobei deren Anzahl  $m$  die Einbettungsdimension ist, das Einbettungsfenster die Breite  $m \cdot \tau$  besitzt und für jeden dieser Zeitversatzvektoren eine Umgebung  $U$  aus allen Zeitversatzvektoren gebildet wird und der Abstand dieser Zeitversatzvektoren zum jeweils betrachteten Zeitversatzvektor kleiner als ein vorbestimmter Wert  $\epsilon$  ist, und
  - c) Ermittlung eines Vorhersagewertes  $s_{n+1}$  als arithmetischer Mittelwert aus den Zukunftswerten der Nachbarn des jeweils aktuellen Zeitversatzvektors in der Umgebung  $U$ .
12. Vorrichtung (4) zur Verarbeitung von Strömungsdaten eines strömenden Mediums, das eine Messeinrichtung zum Messen von Werten mindestens eines Strömungsparameters, der für die Geschwindigkeit des Mediums charakteristisch ist, eine Recheneinrichtung zur Erstellung und Verarbeitung von Zeitreihen auf der Grundlage eines nicht-linear deterministischen Vorhersagemodells, eine Vergleichereinrichtung zum Vergleich von Vorhersagewerten mit vorbestimmten Referenzkriterien und eine Ausgabeeinrichtung für Vorhersagewerte und/oder davon abgeleitete Steuersignale umfasst.
13. Vorrichtung gemäß Anspruch 12, die Teil einer Steuereinheit eines Windgenerators (1) ist, wobei die Messeinrichtung ein Windmesser (2) ist und eine Stelleinrichtung zum Abbremsen des Windgenerators (1) bei Ausgabe vorbestimmter Vorhersagewerte und/oder Steuersignale vorgesehen ist.
14. Verwenden eines Verfahrens oder einer Vorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche zum Betrieb eines Windgenerators.

---

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

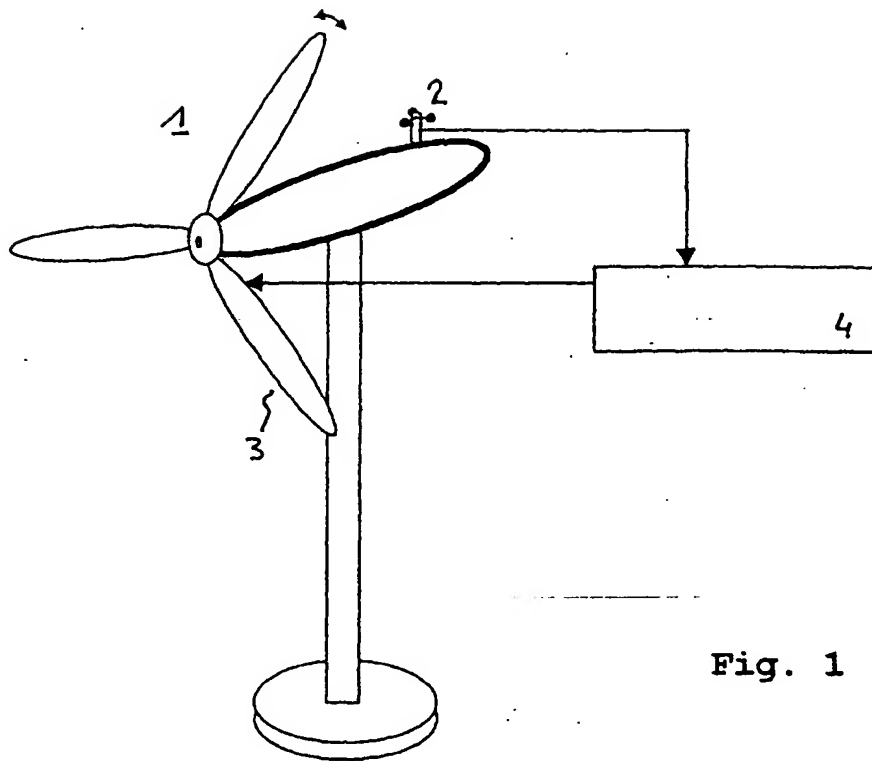


Fig. 1

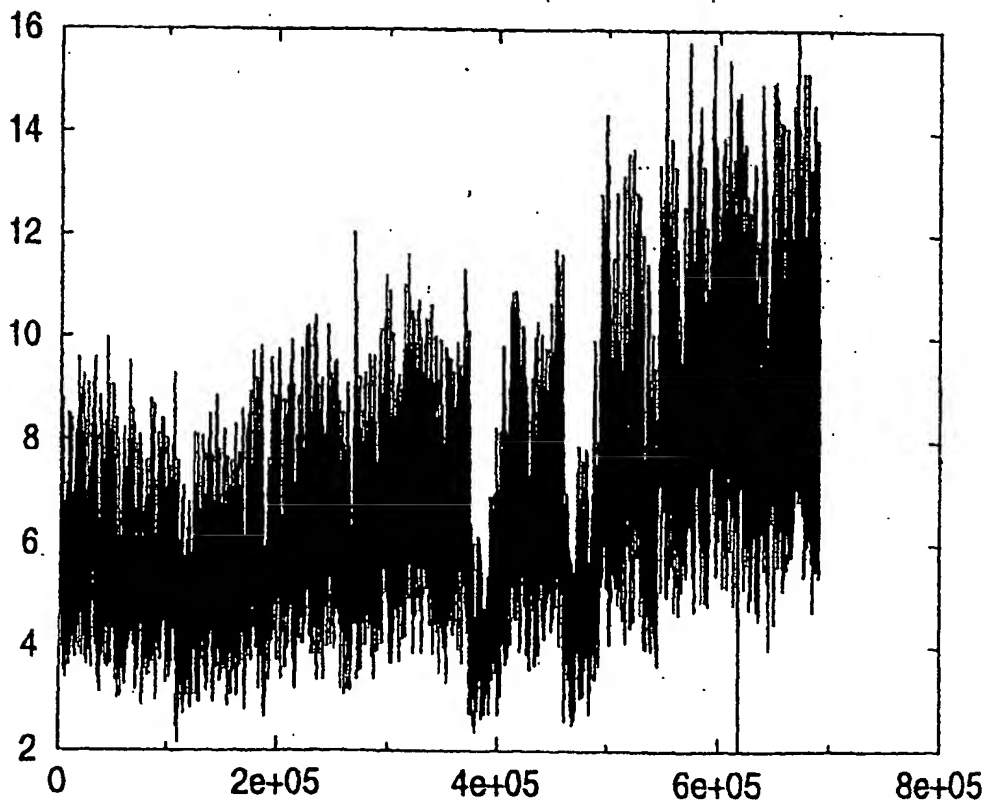


Fig. 2

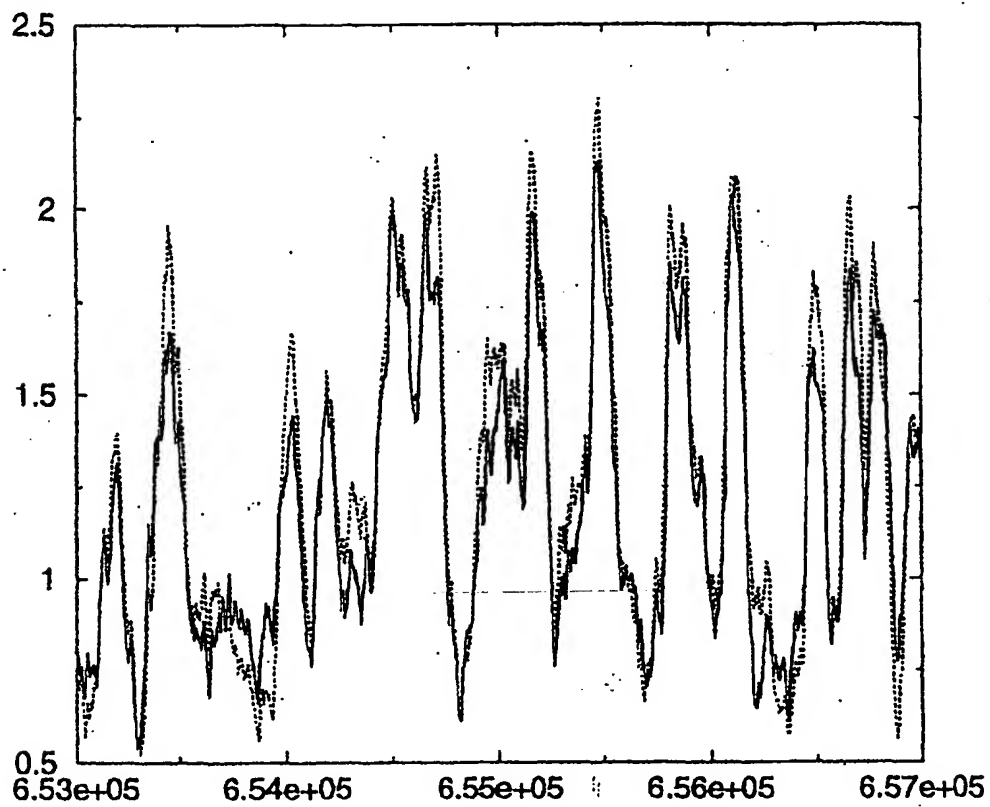


Fig. 3

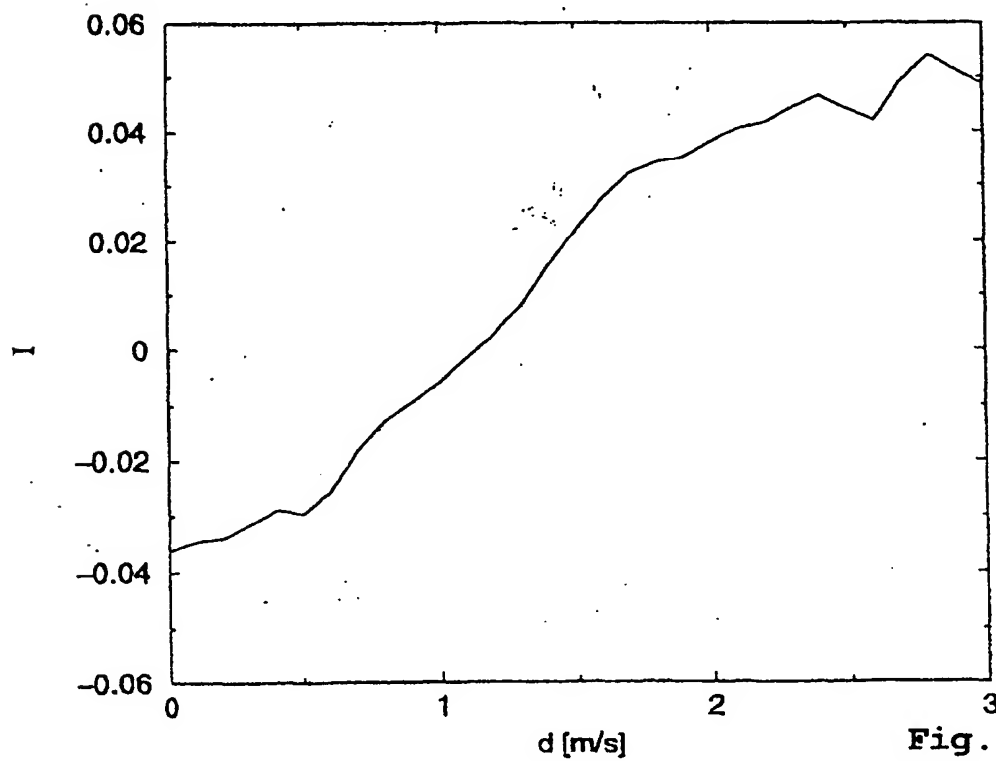


Fig. 4

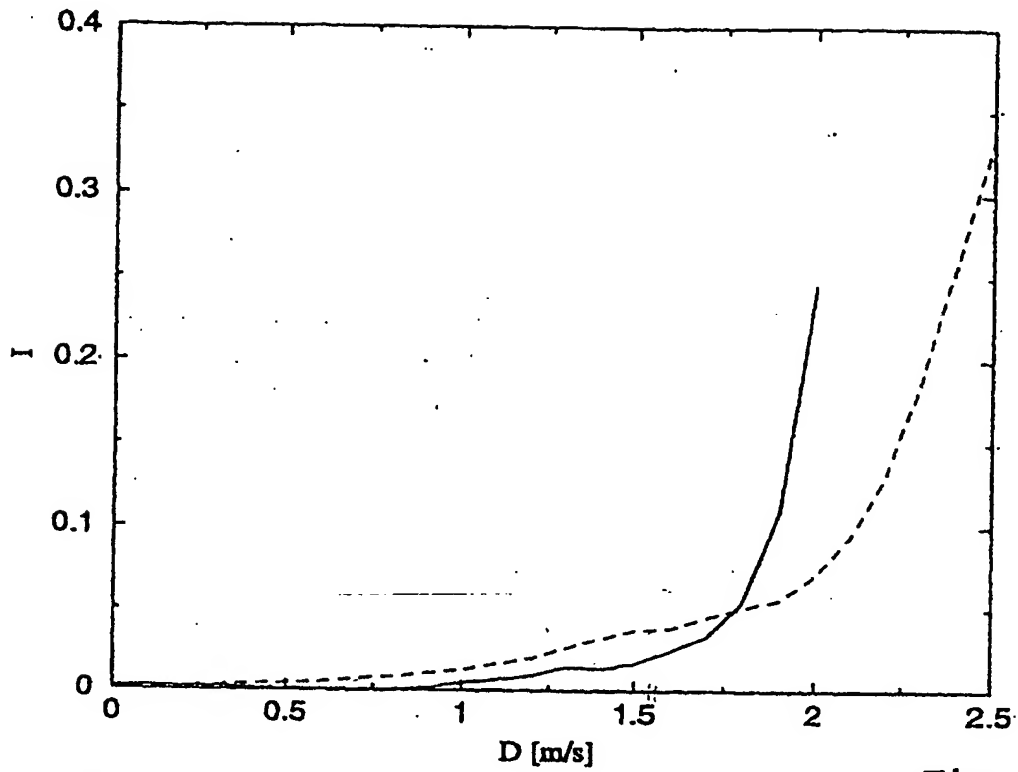


Fig. 5a

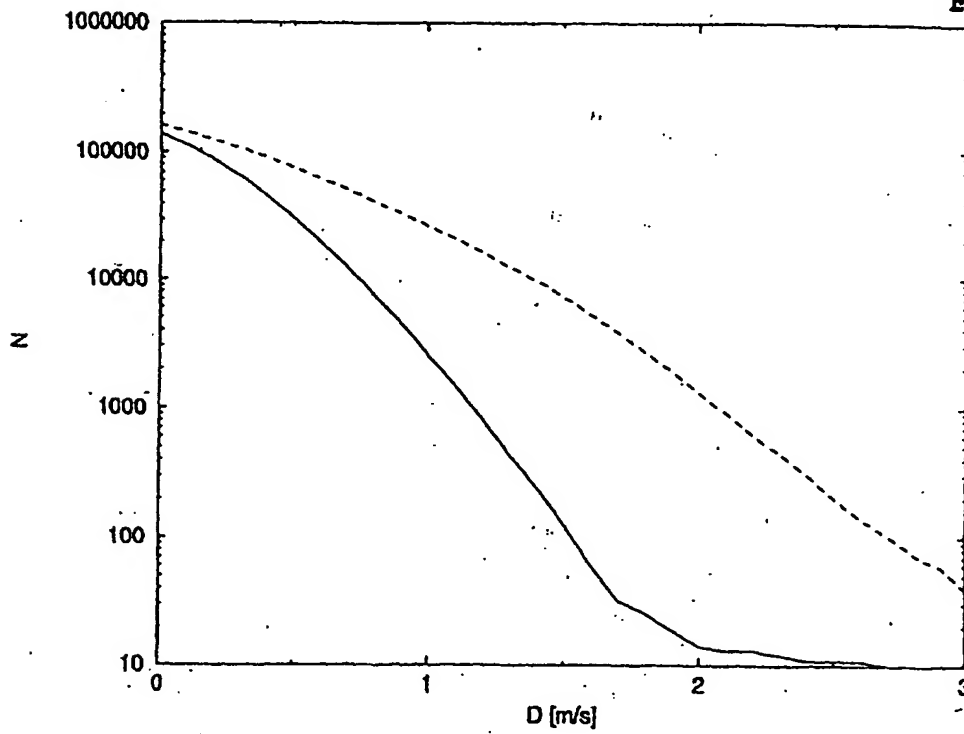


Fig. 5b

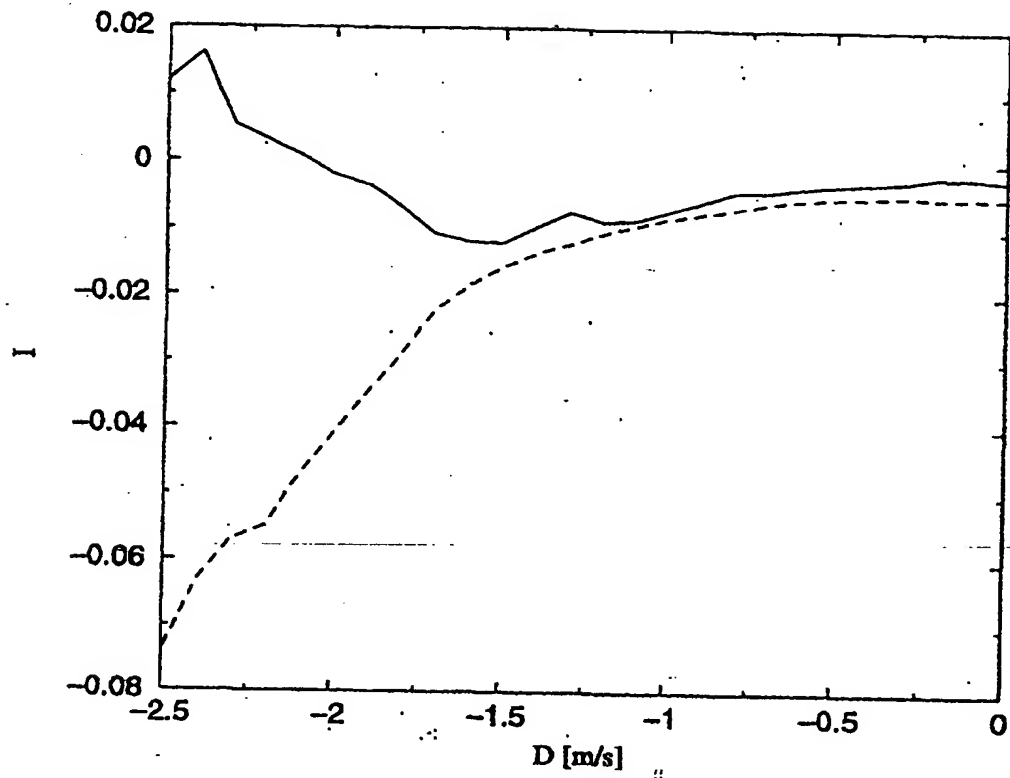


Fig. 5c

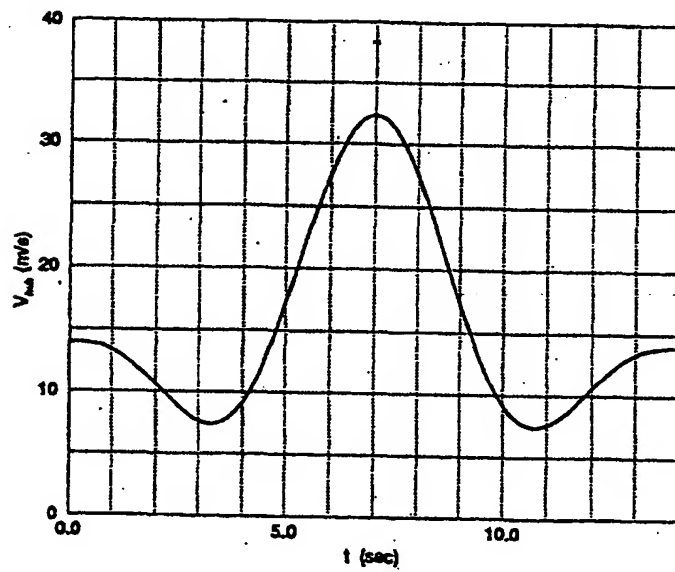


Fig. 6

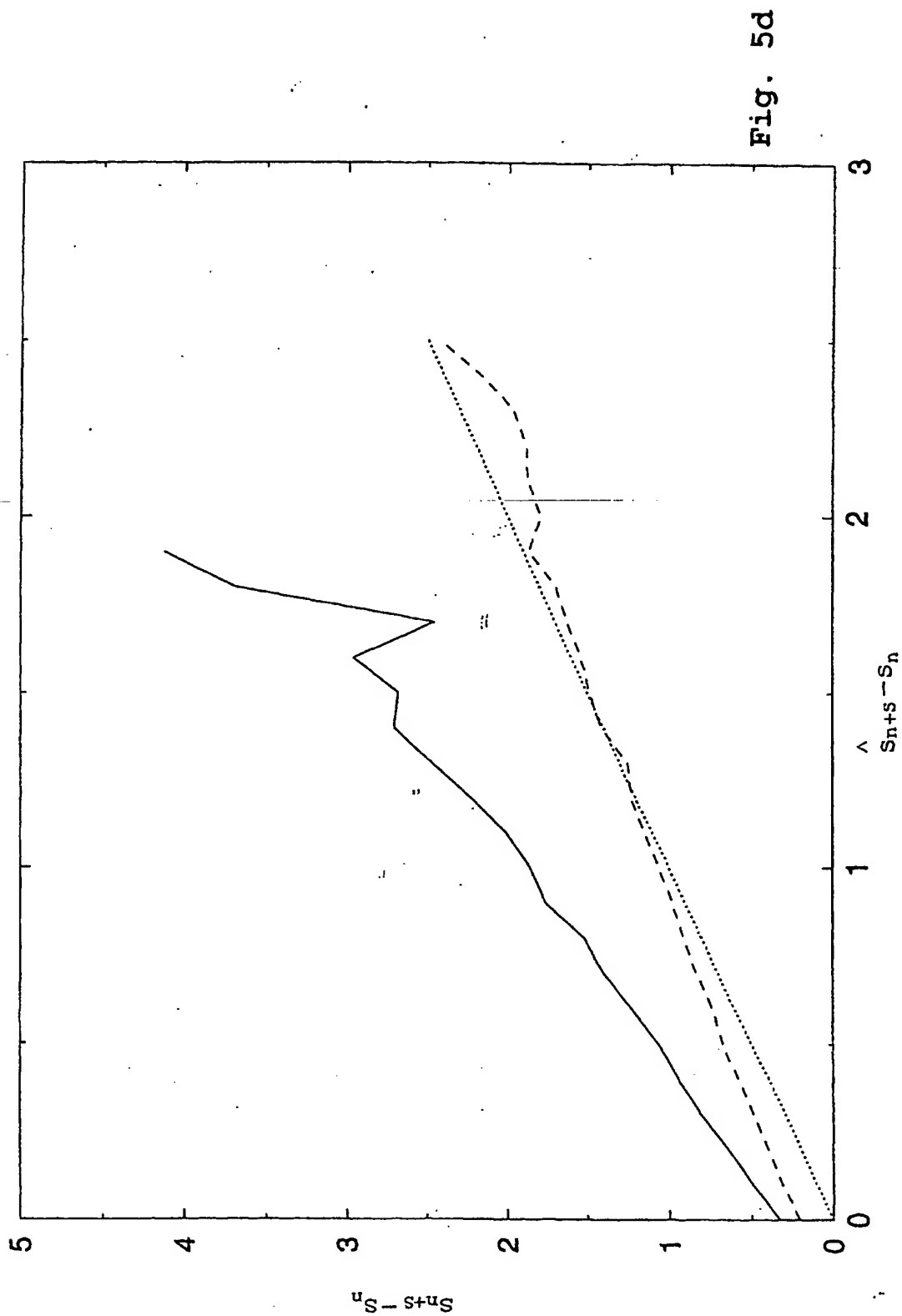


Fig. 7

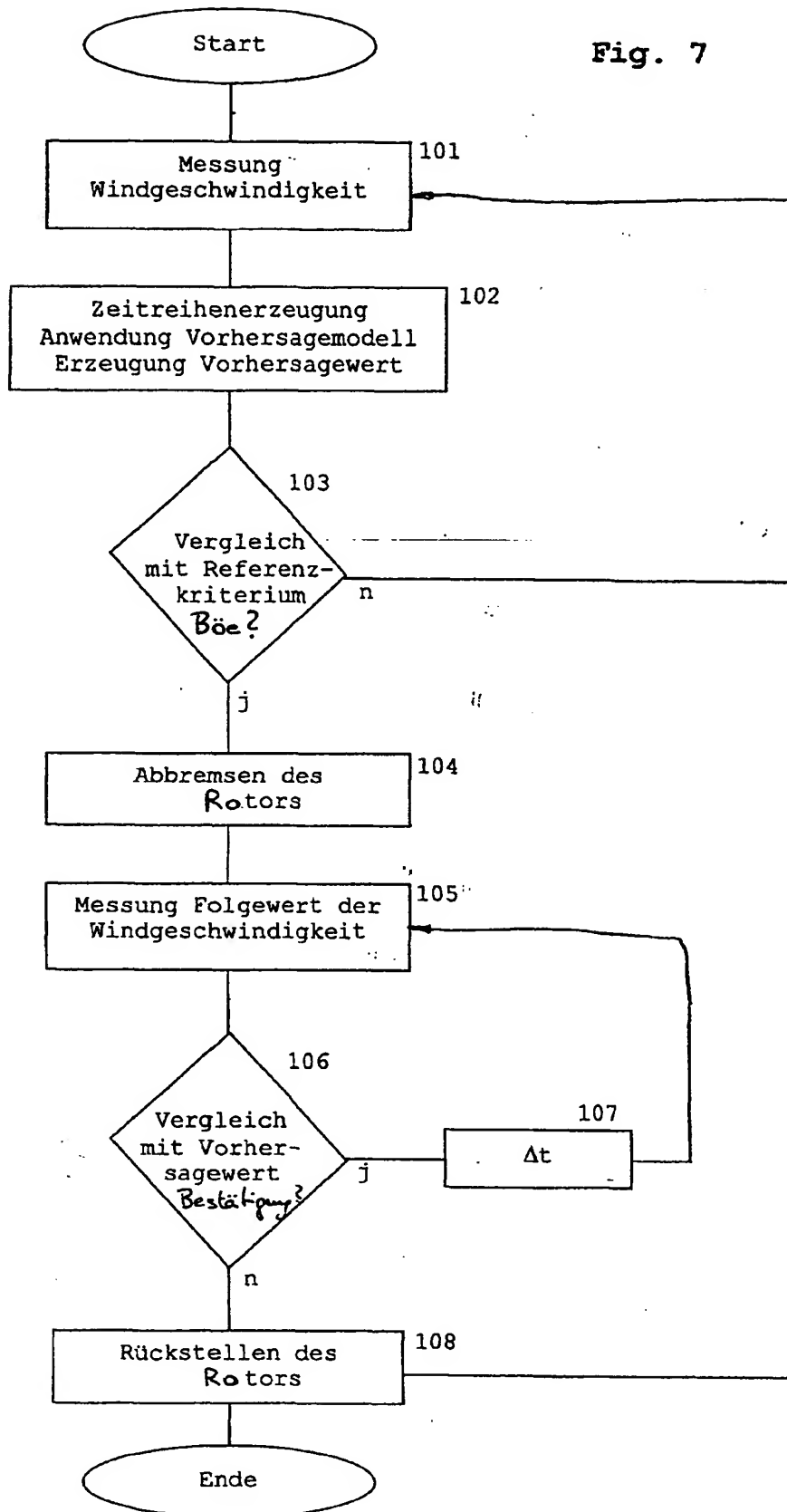
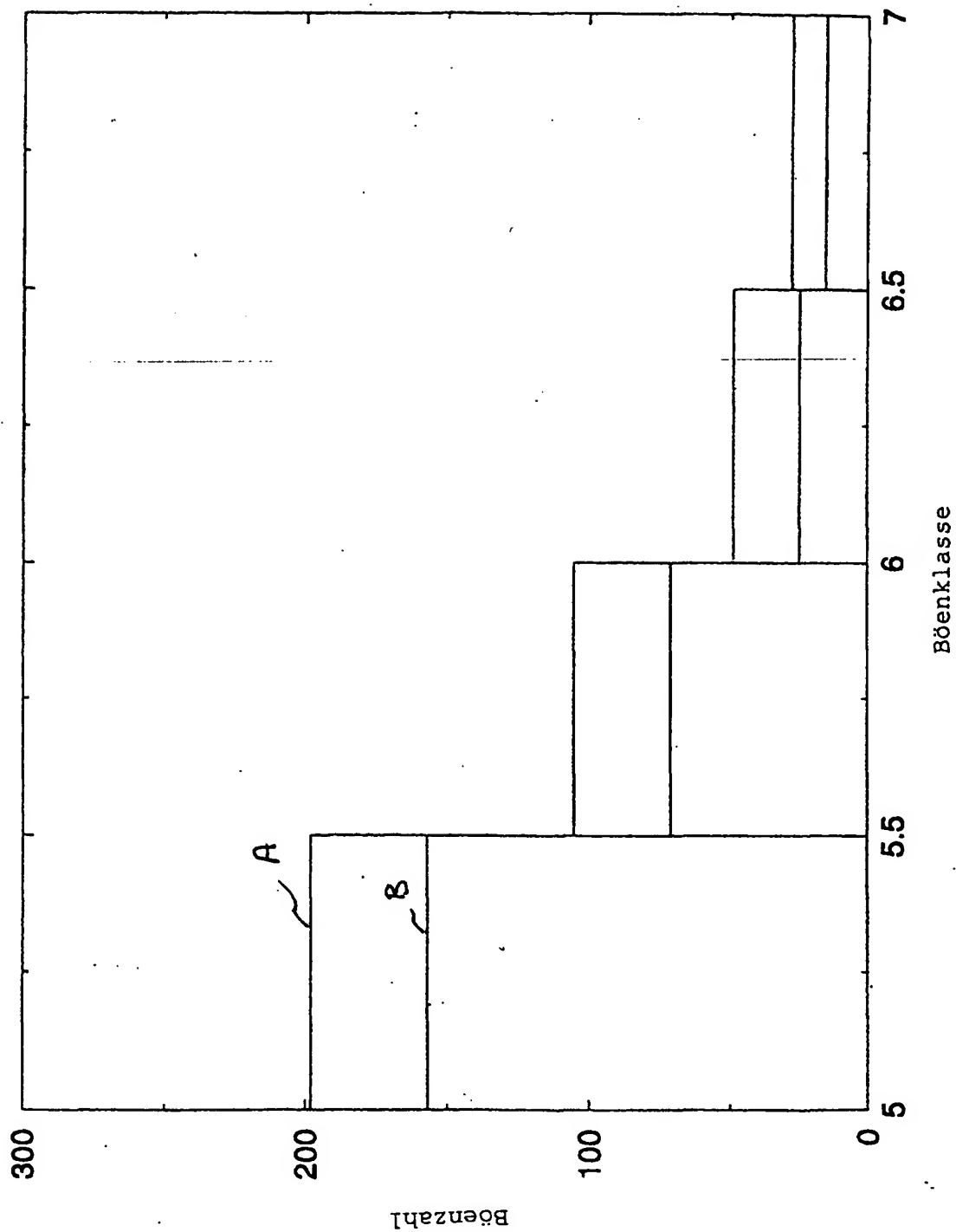


Fig. 8



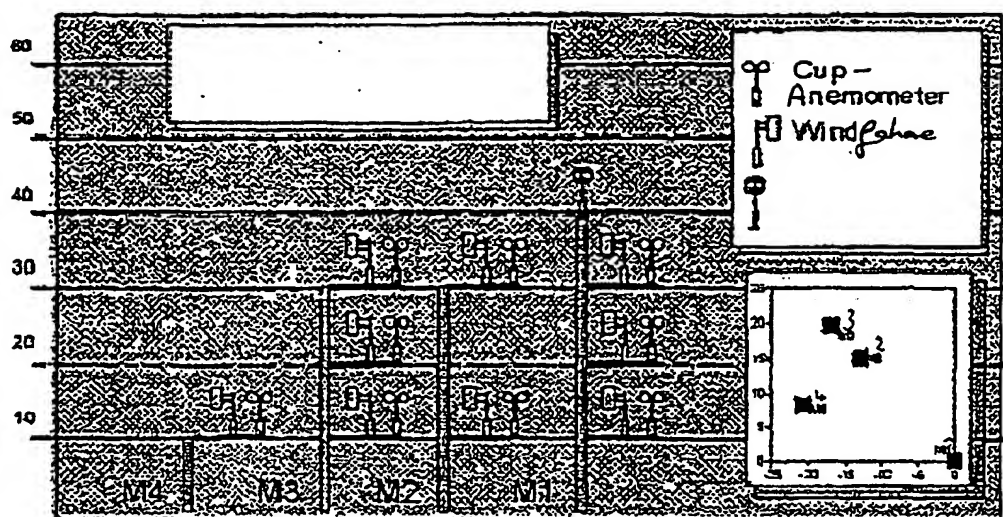


Fig. 9